



重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议

葛大庆¹ 戴可人^{2,3} 郭兆成¹ 李振洪⁴

1 中国自然资源航空物探遥感中心,北京,100083

2 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

3 成都理工大学地球科学学院,四川 成都,610059

4 英国纽卡斯尔大学工学院,英国 纽卡斯尔,NE1 7RU

摘要:2017年以来,以四川茂县新磨村高位垮塌、金沙江白格滑坡为代表的重大地质灾害多次发生,呈现出隐蔽性强、突发性高、破坏力大等特点,难以早期发现。值得注意的是,尽管地质灾害防治工作已在全国大范围开展并受到国家层面的高度重视与支持,但绝大部分灾害仍发生于全国现有地质灾害隐患点分布以外的区域。对这些人迹罕至、人不能至且观测条件苛刻的地区的重大隐患进行有效早期识别,是当前地质灾害防治工作尚需解决的难题和重要任务。在总结合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术特点与其应用局限的基础上,从光学遥感、InSAR、激光雷达等综合遥感测量的角度提出了以“形态、形变、形势”(三形)为观测内容、以定性识别灾害隐患位置、定量监测灾害体变形幅度、依靠综合遥感动态监测数据提升隐患识别能力的技术思路。对未来工作提出了若干建议与思考,以期服务于重大地质灾害隐患综合判断与早期识别工作。

关键词:重大地质灾害;早期识别;综合遥感;InSAR;“三形”观测

中图分类号:P237

文献标志码:A

2017年和2018年对地质灾害行业来说,是大灾多发的两年,也是防灾工作思路发生改变的一年。尽管这两年地质灾害发生数量、造成死亡失踪人数较2016年分别减少了26.7%、13.1%^[1]和60.6%、68.4%^[2],但造成的直接经济损失却有所增加^[1]。四川茂县6·24特大型滑坡、贵州纳雍8·28大型山体滑坡、金沙江10·10白格滑坡、雅江10·17冰崩堵江等重大地质灾害所造成的危害与影响极其严重,促使中国地质灾害防治界与遥感测绘界对调查监测和防控模式进行了重新思考,并初步形成了借助遥感技术优势、加强灾前隐患排查和早期识别的共同认识。此后,众多研究者应用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术、光学遥感、航空或无人机激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)等手段陆续在四川、重庆、贵州等地区(含三峡地区)开展斜坡变形监测的规模化测试与应用^[3]。其中,InSAR技术在国内的发展历程可追溯到2000年左

右的三峡新滩、链子崖角反射器InSAR测量试验^[4],从此开启了地质灾害InSAR的监测研究。在此后近20年的研究过程中,国内外学者以三峡库区滑坡^[5-8]、四川西部山区滑坡^[9-15]、黑方台黄土滑坡^[16-17]、甘肃舟曲泥石流^[18]等地区作为主要试验区域,在技术探索、方法试验、活动特征识别、大型变形测量以及与地面手段联合应用等方面,尝试着回答“能测什么,能测多大,能测多准,用什么方法”的诸多基础问题,InSAR技术逐渐在地质灾害防治界得到了广泛关注并最终得到认可。

2017年以来,著名地质灾害专家殷跃平、许强等学者共同提出并倡导了面向重大地灾隐患早期识别的“三查”技术体系^[19-20],从“空-天-地”对地观测的角度明确了测量的工作层次建议。随后,在围绕落实中央有关地质灾害防治“两个结合,三个转变”的新要求中,其向各级主管部门提出了这一技术思路,丰富了现有的调查监测手段。目前,“三查”体系与综合遥感(对地观测)的应用已在个别地

收稿日期:2019-02-27

项目资助:国家重点研发计划(2017YFB0502700);国家自然科学基金(41801391);四川省科技计划项目(2019YJ0404)。

第一作者:葛大庆,博士,教授级高工,主要研究方向为雷达卫星与InSAR技术应用。survery@sina.com

区的灾害调查和灾后应急中发挥了显著作用,但大规模组织区域性地质灾害早期识别的工作还不够充分和全面,仅在个别省份开展了试验示范。面对大范围、规模化的监测需求,回答从形变到致灾的问题,仍有许多工作要做,反观目前整体的技术积累和人才队伍,也有不少基础认识需要统一。

1 重大地质灾害隐患识别问题与需求

1.1 重大地质灾害的形式与特点

中国的山地丘陵区约占国土面积的65%,崩塌、滑坡、泥石流等灾害隐患多、分布广、防范难度大,是世界上地质灾害最严重、受威胁人口最多的国家之一^[21]。相较于地震、洪涝等重大自然灾害,地质灾害是日常发生频率最高的灾种。特别是在中国西南地区,地形复杂,河流下切,地势高差悬殊,地形山高坡陡,并有若干重大地震发生的记录。因此,中国重大地质灾害在四川、西藏、云南、贵州等西南地区省份高发频发。

5·12汶川大地震后,震区地质灾害规模与巨型灾害体聚集密度均举世少有,如大光包滑坡、文家沟泥石流、唐家山堰塞湖、新磨村高位山体崩塌等,呈现出以崩滑-碎屑流-堰塞湖-溃决为主的地质灾害链形式^[22]。而地质灾害诱发的松散堆积物仍有超过100亿 m^3 堆积在深山峡谷^[22],地震影响的长期效应或许还将持续。因此,对震区地质灾害链的监测和预防是当前工作之一。

除强震区之外,由冰崩、冰湖溃决引发的滑坡、泥石流堵江形成堰塞体等灾害是近年来青藏高原地区地质灾害的主要形式^[23]。如发生于2018-10的雅鲁藏布江峡谷冰崩引发的滑坡泥石流造成了河道堵塞并形成堰塞湖,是典型的冰崩引发的地质灾害,给下游人民生活生产产生了巨大影响。随着未来全球气候变暖的大趋势,青藏高原冰川退缩崩塌、冰碛湖溃决等潜在的风险将会有所增加。未来,西藏高海拔地区地质灾害发生的频率可能会有所加剧,不容忽视。

1.2 对重大地质灾害隐患早期识别的需求

如何从源头上更早地识别、判断和评估这些潜在的、隐蔽性极强的重大地质灾害隐患及其链式地质灾害,是当前地质灾害防治工作的重点任务和难点问题。如何对这些地处偏远、自然条件恶劣、人工调查工作难以有效开展的区域达到“虽人不能至,但掌握情况”的局面,是地质灾害隐患早期识别与监测预警的重点工作。同时,调查工作需围绕定性评估,满足定量监测与综合判断的

多重需求,从而清楚地确定哪里可能存在灾害隐患、灾害隐患的活动范围与变形幅度、致灾的概率与程度有多大。

地质灾害预警预报取决于灾害隐患的早期识别、持续监测和地质分析与判断。2017年以来,陆续发生的高位垮塌、高速远程滑坡等重大地质灾害多是在已有调查工作的隐患点范围之外,如何更加全面地识别隐患对地灾调查工作提出了新的要求。2018年7月份以来,自然资源部领导多次调研听取了各方意见,强调要“研究原理、发现隐患、监测隐患、发布预警”,要求综合运用InSAR、高分辨率卫星遥感、无人机遥感、机载激光雷达测量等多种新技术手段,进一步提高全国地质灾害调查评价精度,搞清楚隐患点在哪里;要求将技术逻辑与行政逻辑结合起来,研究地质灾害成因,加强工作应用性研究,要在发现隐患、监测隐患,特别是地质灾害可能发生的时间、地点、成灾范围和影响程度等预警预报方面下更大功夫。

2 InSAR技术的局限性与应用定位

近两年来,InSAR技术极其迅速地被地质灾害防治领域专家学者、工程建设单位等广泛熟知,大批相关项目纷纷大规模采用该技术参与地质灾害的防治与早期识别。尽管InSAR技术已发展20余年,给地质灾害监测与防治等相关应用带来了一些突破性的实用结果,但广大一线应用者对此技术的整体认知程度较低,在实际应用时对其使用限制与能力范围了解不够,寄希望于用InSAR解决不同条件的所有类型滑坡的早期识别问题。因此,有必要对其能力特点、应用条件和局限性进行分析、总结与说明。

2.1 有效测量的技术设计

地表移动变形是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害孕育或发生的基本表现形式。对合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)信息的应用方面,集中于以相位干涉测量为基础的InSAR技术以及基于SAR影像强度信息的图像相关技术。InSAR应用需要顾及其技术特点,存在有效观测、识别探测和精准监测的层次^[24-25]。有效观测是基础,在有效观测的基础上实现识别和探测,从定性角度确定感兴趣对象,在此基础上通过方法技术优化,提高观测质量和精度。SAR侧视成像的固有特点决定了InSAR测量的敏感程度,而入射参数与地形参数的关系决定能否有效成像。SAR为相干系统,相干性是InSAR测量的前提,

这一特性要求重复轨观测时确保相干,既要求卫星系统的基线、噪声等满足 InSAR 的要求,同时要求观测对象的环境保持相对稳定,确保空间和时间基线的相干。实际应用中,常常受制于地物散射特性的变化,引起时间失相干。应用中需考虑波长周期和分辨率的有效组合,尽可能在技术设计上进行优化。同时,需从成灾到致灾过程中的变形强度和形式上设计 InSAR 数据处理技术及其组合。在此基础上,通过数据处理算法优化与误差建模^[23],降低噪声(如大气波动、轨道误差等因素)对形变信息(参数估计)的影响。总体上,应侧重从卫星参数、环境参数和对象参数等方面进行考虑(表 1),综合应用 D-InSAR(differential InSAR)常规方法、小基线集或永久散射体等时序分析技术、SAR 影像强度相关的偏移量估计方法、宽带 SAR 子带干涉等进行技术设计^[3,5,25-26]。

表 1 InSAR 形变监测应用需要顾及的参数

Tab. 1 Parameters That Should Be Taken into Account in InSAR Deformation Monitoring Application

参数类别	具体参数	应用需求
卫星参数	重复轨道要求	相同的频率、入射角(相同轨道)
	卫星倾角、成像入射角度	与地形相关
	成像方式要求	TOPS、条带、聚束模式数据的统一
	相位保真度	系统载荷与星地指标
	轨道参数稳定性	姿态、轨道控制精度
环境参数	分辨率、重访周期	可测量的精细程度与最大相对变化量
	空间基线	取决于空间基线-临界基线条件(因卫星而异)
	地物变化程度	时间间隔(视监测区域地物分布状况)
对象参数	季节性影响	地物变化,大气变化特征
	变形幅度匹配	相位干涉测量的有限性(极小与极大)
	图像相关	非相干移动(超过相位梯度约束)与大变形测量
	片段与过程	短期内的相对测量与变化过程 长期连续测量

表 2 InSAR 不同技术方法的适用性

Tab. 2 Applicability of Different InSAR Algorithms

方法技术	应用条件	应用目标	优选条件	应用效果
差分干涉测量 D-InSAR	短期相干性良好,滑移方向可测	活动状态识别,短時間间隔	长波长、短周期、高分辨率	定性分析,大范围可行
时序分析(永久散射体时序 InSAR、小基线集时序 InSAR 等)	植被覆盖度低,滑移方向可测	识别以及活动特征表征	长时序 SAR 数据,观测点密度取决于环境因素	定性/定量,可大范围进行,处理要求高
宽带 SAR 子带干涉	可布设反射器网络	大变形连续测量	高分辨率 SAR 局部变形场	定性/定量,单个滑坡体监测
Offset-tracking	高分数据,相干性良好	方位向与距离向,大变形场探测	高分辨率 SAR 优先,影像信息,非干涉测量	定性为主,单个坡体,不适合大范围

2.2 应用能力及其定位

地质灾害类型多样,地形条件复杂,大气波动显著,精准监测的应用难度较大,需要改变追求绝对精度和绝对位移量的认识,以有效探测形变场的存在为第一目标。在事前进行详细适用性评价和系统设计,从灾害体的自然环境、变形特征、卫星数据、InSAR 技术、处理方法、应用目标等予以综合评判(表 2),实现从发现识别、调查评估、监测预警等方面逐步递进。

1) 科学认识 InSAR 的实际能力。

InSAR 提供了地表移动变形数据,从区域上解决了大范围快速调查和排查的难题,通过变形数据有助于地质灾害早期识别。实践中,科学认识 InSAR 技术的能力和作用是应用的前提,围绕灾害形变分为 3 个层次:

(1) 活动识别:发现变形坡体,明确活动幅度——辅助地面认识判别。

(2) 变形表征:表征变形体的范围、边界和强度——活动特征全面表征。

(3) 连续监测:从蠕变、加速、快速各阶段变化——实现对过程的监测。

针对地质灾害调查过程的应用目标,InSAR 具备从定性测量到精准测量的能力,提供了识别、探测到预警过程中的重要信息。但是,从变形现象到确定灾害隐患,仍需多源地学数据的综合应用。

2) 切忌挑战 InSAR 技术的极限。

在应用实践中,需要科学设计 InSAR 监测技术方案,选择与应用目标相一致的数据、处理方法,更为精准地提取数据,切忌因不科学的认识而人为给予 InSAR 技术过高的应用定位,也不宜挑战 InSAR 技术在观测形变梯度极限、观测方向、重复频率等领域的不足。就 InSAR 数据处理过程而言,必须清楚软件(系统)所用算法的前提条件、数学(物理)模型,并结合实地调查与认识,提高从形变现象到确定隐患的判断能力。

3 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感技术的应用定位

重大地质灾害多分布于高海拔、自然条件恶劣、人不能至、人迹罕至的地区,遥感技术的出现使人们有了便捷获取此类地区信息的能力。当前的遥感技术已从单一的光学成像走向多频段、多参数的对地观测。通过利用不同类型的传感器(如 SAR、LiDAR 等),基于多种多样的信息获取平台(如卫星、航空、无人机与地面观测),可对潜在的危害区域进行有效识别、发现和监测及灾后应急调查。

在遥感技术应用的发展过程中,前期主要侧重于基于可见光、高光谱、红外等多波段成像的图

谱测量,从可见光影像及多光谱数据的变化中揭示孕灾环境、受灾范围、致灾因子等特征变化。随着 InSAR、LiDAR、全球导航定位系统(global navigation satellite system, GNSS)等对地观测手段的迅速发展,更侧重于通过对地表的观测揭示灾害体的形态与位移变化特征,进一步与相关物理模型相结合。遥感在地质灾害领域的应用已从光学遥感为主的图谱影像测量走向多种遥感手段综合的图谱影像与形态、形变测量相结合的综合遥感应用(图 1^[23])。综合遥感手段在国外已广泛用于地质灾害的早期识别、隐患排查和监测预警等工作,有助于改变以往过分依靠人工调查-发现隐患-布设监测仪器的工作模式,为人们认识地质灾害的出现、发展和破坏等整个演变过程的认识提供强有力的支撑。



图 1 空-天-地多源遥感与地面测量集成的地质灾害调查监测技术体系

Fig. 1 Geological Disaster Investigation and Monitoring Technology System Integrated with Space-Air-Ground Multi-source Remote Sensing and Ground Measurement

综合遥感技术在中国地质灾害防治工作中的应用主要体现在早期识别、隐患排查、监测预警、灾害应急 4 个方面,遵循分层递进、从面到点、由粗到细、星地协同的工作模式。随着卫星资源、遥感数据的进一步丰富,地质灾害综合遥感应用技术体系已在实践中发挥作用,必将逐步被地质灾害防治界所接纳并推广应用。

4 “三查”的内容——形态、形变与形势

重大地质灾害隐患早期识别中的综合遥感应用主要体现在解决形态、形变和形势的调查与判断方面(图 2)。在技术手段上,利用高分辨率光学遥感与 LiDAR 测量模式进行灾害体的广义形

态调查,研究灾害形成和发育的地质背景、三维形态、地表覆被变化以揭示潜在的成灾状况;利用不同入射角、不同分辨率的 InSAR 监测获取斜坡等地质体地表变形状态,判别灾害体的滑移规模、活动阶段和发展趋势;综合长时间序列 InSAR、地面原位测量数据、地质背景资料等,对成灾状况、当前变形状况、潜在发展趋势与致灾形势进行评判,是当前面向重大地质灾害早期有效识别的关键所在。对照“三查”隐患识别的工作层次,从形态、形变到形势的“三形”调查是遥感观测意义上进行地质灾害隐患早期识别的关键测量对象。

发现隐患、监测隐患是决定预警预报是否可行的关键性基础工作。为推进综合遥感支撑的重大地质灾害早期识别与监测预警,需要统筹卫星、航空等多种遥感数据资源,融合高分辨率光学遥

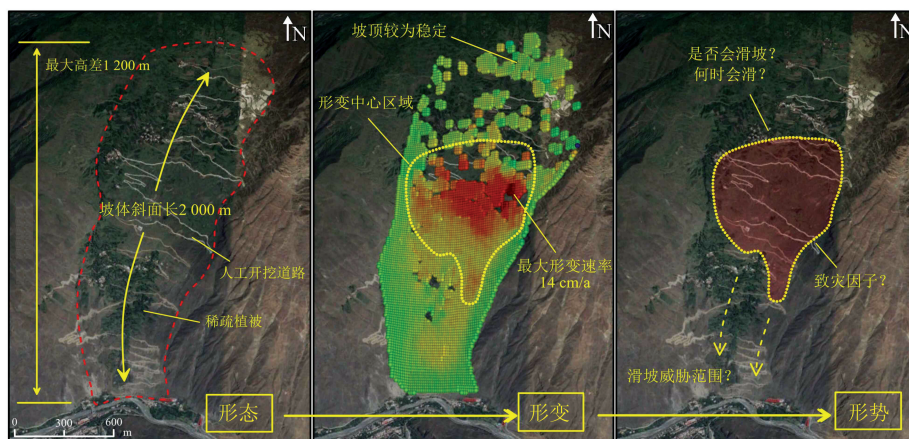


图 2 综合遥感应用中的“三形”调查与判断——以四川理县西山村为例

Fig. 2 “Three Forms” Investigation and Judgment Application with Integrated Remote Sensing—
A Case Study of Xishan Village, Li County, Sichuan Province

感、InSAR、LiDAR 等技术手段,结合形态、形变、形势进行综合判断,推进地质灾害普查、详查、核查,形成稳定的技术体系与业务能力,提高地灾识别与监测预警能力。

从工作层次上,在开展区域尺度地质灾害隐患普查的基础上,对识别出的隐患进行风险评估,根据其风险程度开展重大地质灾害的长期监测。侧重应用高分辨率 InSAR 持续监测重大隐患的影响范围和发展趋势,表征其运动特征,增强对整体加速、局部加速的认识,提高灾害预警的准确性。

5 思考与建议

重大地质灾害隐患早期识别工作已经得到了地质灾害界的广泛重视,不再局限于单一学科领域的研究。2018 年 11 月于贵阳召开的第一届重大地质灾害隐患早期识别技术研讨会^[27],集中了目前国内遥感、InSAR 与地质灾害界的广大一线专家学者和技术人员。通过对综合遥感,特别是 InSAR 技术的应用定位、实际能力、现有条件和未来发展的探讨,结合四川、贵州、三峡、甘肃、陕西等地区大量的应用案例,对其用于重大隐患早期识别的可行性与科学性进行了深入交流,凝聚了共识。此次研讨会引起了地灾学科界的极大反响,研究队伍日益壮大,一方面体现了地质灾害隐患早期识别工作的复杂性,需要多学科、多部门的协同工作,另一方面体现了地质灾害隐患早期识别工作的重要性与迫切性。

结合目前重大地质灾害防治与管理工作中对早期识别的迫切需求,对未来工作提出如下建议:

1) 从不同渠道共同推动“强化综合遥感技术

应用,推动重大地质灾害隐患早期识别”的理念,以全国地质灾害高易发区综合调查、川藏线地质灾害调查等入手,推广普查、详查、核查的重大地质灾害隐患识别技术,形成中国地质灾害工作链中新型的调查工作模式。以贵州、四川、陕西为样板工程,推动“空-天-地”协同的省级地质灾害常态化监测模式。

2) 面向日常灾害应急处置,推动建立重大地质灾害应急处置技术联盟。以行业主管部门为需求牵引,形成由各方专家、企业、高校科研院所为支撑的技术联盟,由企业提供高分辨率光学与 SAR 遥感数据,由地灾与遥感专业技术队伍进行快速处理,为前线专家组会商提供快速、准确、实用的数据支撑。

3) 围绕限制进一步规模化应用的综合遥感技术,特别是 InSAR 技术,需依托开展相关研究的高校与科研院所,集中技术力量开展区域性高陡边坡 InSAR 监测应用的关键技术攻关,突破三维形变反演、大范围场景下的滑坡识别及其形变信息自动化处理以及融合永久散射体与分布式散射体的 InSAR 时序分析技术研究,从方法上解决有效观测、精准观测和快速处理的技术瓶颈,推动构建适合中国情况的规模化应用的广域地质灾害综合遥感监测平台(如 GEP, <https://geohazards-tp.eo.esa.int>)。

4) 朝着业务化方向发展,SAR 卫星是关键和基础。需要加快推进中国 L 波段雷达卫星在轨任务的科学编排,强化地质灾害监测应用目标,形成支撑服务常态化的地质灾害调查监测的卫星观测任务。行业部门推动卫星应用系统建设,探索面向技术联盟的国产卫星数据渠道。提前谋划下一代中国自然灾害监测卫星系统,推进后续工程

星和新体制 SAR 卫星预研。

5) 构建定期交流与重大灾害会商的工作机制, 通过行业牵头、专家研讨、企业参与的方式, 推动形成一批适应中国地质灾害特点的技术规范与标准体系。主动探索技术研究与行政管理的统一, 增强专业技术研究的针对性和实用性, 从被动救灾到主动防灾, 回应防灾减灾的实际需求, 努力满足防治工作中的行政指挥需要。

6) 在综合对地观测(遥感)大数据的基础上, 将专家经验和技术方法转化为机器学习规则与方法, 通过长时序观测数据开展人工智能地灾隐患的早期识别研究。从简单样本做起, 逐步解决地灾隐患在形态特征上非规则、多样化和在形变过程上非线性、非均一的有效判断, 尽可能提高效率和准确性。

参 考 文 献

- [1] Voice of Land. National Geological Disasters in 2017 and Prediction of Geological Disaster Trends in 2018[OL]. <http://dy.163.com/v2/article/detail/D7NDC18H0514N88B.html>, 2018(国土之声. 2017年全国地质灾害灾情及2018年地质灾害趋势预测[OL]. <http://dy.163.com/v2/article/detail/D7NDC18H0514N88B.html>, 2018)
- [2] Ministry of Natural Resources. National Geological Disasters in 2018 and Prediction of Geological Disaster Trends in 2019[OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1622170215265411461&wfr=spider&for=pc>, 2019(自然资源部. 2018年全国地质灾害灾情及2019年地质灾害趋势预测[OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1622170215265411461&wfr=spider&for=pc>, 2019)
- [3] Ge Daqing. From InSAR Identification Detection of Landslide Deformation to Monitoring and Warning [OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/fPqzt06ZDNVqLp9PzrTACw?tdsourcetag=s_pctim_aiomsg, 2018(葛大庆. 从滑坡形变的 InSAR 识别探测到监测预警[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/fPqzt06ZDNVqLp9PzrTACw?tdsourcetag=s_pctim_aiomsg, 2018)
- [4] Xia Ye, Kaufmann H, Guo Xiaofang. Differential SAR Interferometry Using Corner Reflectors[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto, Canada, 2002
- [5] Xia Ye, Fan Jinghui, Li Man, et al. Landslide Monitoring Technology with High-Resolution Radar Data in the Three Gorges Reservoir Area[C]. The 18th China Symposium on Remote Sensing, Wuhan, China, 2012(夏耶, 范景辉, 李曼, 等. 高分辨率雷达数据三峡库区滑坡监测技术[C]. 第十八届中国遥感大会, 武汉, 2012)
- [6] Liu Peng, Li Zhenhong, Hoey T, et al. Using Advanced InSAR Time Series Techniques to Monitor Landslide Movements in Badong of the Three Gorges Region, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 253-264
- [7] Xia Ye, Kaufmann H, Guo Xiaofang. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-InSAR and Corner Reflectors[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1167-1172
- [8] Singleton A, Li Zhenhong, Hoey T, et al. Evaluating Sub-pixel Offset Techniques as an Alternative to D-InSAR for Monitoring Episodic Landslide Movements in Vegetated Terrain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 133-144
- [9] Dai Keren, Li Zhenhong, Tomás R, et al. Monitoring Activity at the Daguangbao Mega-Landslide(China) Using Sentinel-1 TOPS Time Series Interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 186: 501-513
- [10] Dong Jie, Zhang Lu, Li Menghua, et al. Measuring Precursory Movements of the Recent Xinmo Landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 Datasets [J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 135-144
- [11] Zhao Chaoying, Kang Ya, Zhang Qin, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 993
- [12] Tang Yixian, Zhang Zhengjia, Wang Chao, et al. The Deformation Analysis of Wenjiagou Giant Landslide by the Distributed Scatterer Interferometry Technique[J]. *Landslides*, 2018, 15(2): 347-357
- [13] Qu Tengting, Lu Ping, Liu Chun, et al. Hybrid-Sar Technique: Joint Analysis Using Phase-Based and Amplitude-Based Methods for the Xishancun Giant Landslide Monitoring[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 874
- [14] Chen Qiang, Cheng Haiqin, Yang Yinghui, et al. Quantification of Mass Wasting Volume Associated with the Giant Landslide Daguangbao Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake from Persistent Scatterer InSAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 125-135
- [15] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Inter-

- ferometry—A Case Study of Danba, Sichuan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 039-2 049(张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(12): 2 039-2 049)
- [16] Zhao Chaoying, Zhang Qin, He Yang, et al. Small-Scale Loess Landslide Monitoring with Small Baseline Subsets Interferometric Synthetic Aperture Radar Technique—Case Study of Xingyuan Landslide, Shaanxi, China [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10(2): 026030
- [17] Liu Xiaojie, Zhao Chaoying, Zhang Qin, et al. Multi-temporal Loess Landslide Inventory Mapping with C-, X- and L-Band SAR Datasets—A Case Study of Heifangtai Loess Landslides, China[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1 756
- [18] Sun Qian, Hu Jun, Zhang Lei, et al. Towards Slow-Moving Landslide Monitoring by Integrating Multi-sensor InSAR Time Series Datasets: The Zhouqu Case Study, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 908
- [19] Xu Qiang. Constructing a New “Three-Check” System, Innovating New Mechanisms for Disaster Prevention and Control [OL]. http://www.zgkyb.com/yw/20180312_48669.htm, 2018(许强. 构建新“三查”体系 创新地灾防治新机制[OL]. http://www.zgkyb.com/yw/20180312_48669.htm, 2018)
- [20] Chuan Newspaper Observation. Xu Qiang, Member of the National Committee of the Chinese People’s Political Consultative Conference in Sichuan: The Integration of Air and Space to Solve International Problems[OL]. <https://cbgc.scol.com.cn/currentaffairs/73373>, 2018(川报观察. 住川全国政协委员许强:空天地一体化破解国际难题[OL]. <https://cbgc.scol.com.cn/currentaffairs/73373>, 2018)
- [21] Ministry of Land and Resources. Notice of the Ministry of Land and Resources on Printing and Distributing the 13th Five-Year Plan for the Prevention and Control of Geological Disasters in China[OL]. <http://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/201701/W020170103557462354074.doc>, 2016(国土资源部. 国土资源部关于印发《全国地质灾害防治“十三五”规划》的通知[OL]. <http://www.cgs.gov.cn/tzgg/tzgg/201701/W020170103557462354074.doc>, 2016)
- [22] Sina Watch. They Are “Insidious” Than the Earthquake, and This Problem Has not Been Solved for Ten Years [OL]. http://k.sina.com.cn/article_2173867535_8192960f01900d7n1.html?cre=tianyi&mod=pcpager_inter&loc=11&r=9&doct=0&rfunc=57&tj=none&tr=9, 2018(新浪看点. 它们比地震还“阴险”, 这道难题十年未解[OL]. http://k.sina.com.cn/article_2173867535_8192960f01900d7n1.html?cre=tianyi&mod=pcpager_inter&loc=11&r=9&doct=0&rfunc=57&tj=none&tr=9, 2018)
- [23] Ge Daqing. Integrated Remote Sensing Application in Early Identification, Monitoring and Early Warning of Geological Hazards[J]. *City and Disaster Reduction*, 2018(6): 53-60(葛大庆. 地质灾害早期识别与监测预警中的综合遥感应用[J]. 城市与减灾, 2018(6): 53-60)
- [24] He Ping, Xu Caijun, Wen Yangmao, et al. Analysis and Simulation for Time Series InSAR Error Model[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 752-758(何平, 许才军, 温扬茂, 等. 时序 InSAR 的误差模型建立及模拟研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(6): 752-758)
- [25] Wasowski J, Bovenga F. Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi Temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives[J]. *Engineering Geology*, 2014, 174: 103-138
- [26] Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, et al. Persistent Scatterer Interferometry: A Review [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 115: 78-89
- [27] State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology. The Laboratory and the Natural Resources Department of Guizhou Province Jointly Hosted the “Special Symposium on Early Identification of Hidden Geological Hazards”[OL]. <http://www.sklgp.cdut.edu.cn/info/1018/2245.htm>, 2018(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学). 实验室与贵州省自然资源厅联合主办“重大地质灾害隐患早期识别专题研讨会”[OL]. <http://www.sklgp.cdut.edu.cn/info/1018/2245.htm>, 2018)

Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations

GE Daqing¹ DAI Keren^{2,3} GUO Zhaocheng¹ LI Zhenhong⁴

1 China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resource, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4 School of Engineering, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK

Abstract: Since 2017, many serious geological disasters have been reported, including the 2017 mountain collapse at high altitudes in Xinmo Village in Mao County, Sichuan Province, and the 2018 Baige landslide in Jinsha River, most of which are of great destructive power and hard to detect in advance. It is worth noting that although the geohazard prevention has been carried out extensively across the whole country which is supported by the state, many of these geological disasters occur outside the potential geohazard points estimated in advance. The early identification of these undetectable geohazards points remains a big challenge and a crucial task in current geohazard prevention work. In this paper, the characteristics of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) and its inherited limitations are summarized. Based on the integrated remote sensing technologies (including optical, SAR/InSAR and LiDAR), the key observation concept with three forms “morphology, deformation, situation” is proposed. Through the integration of a range of remote sensing technologies, the locations of potential geohazards will be identified qualitatively, and their associated movements will be monitored quantitatively. Finally, a series of thoughts and recommendations are provided to guide our future work for the early detection of serious geological hazards.

Key words: serious geological hazards; early identification; integrated remote sensing technologies; InSAR; “three forms” observation

First author: GE Daqing, PhD, professor-level senior engineer, specializes in radar satellite and InSAR technology application. E-mail: survery@sina.com

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB0502700; the National Natural Science Foundation of China, No. 41801391; Sichuan Science and Technology Plan Project, No. 2019YJ0404.